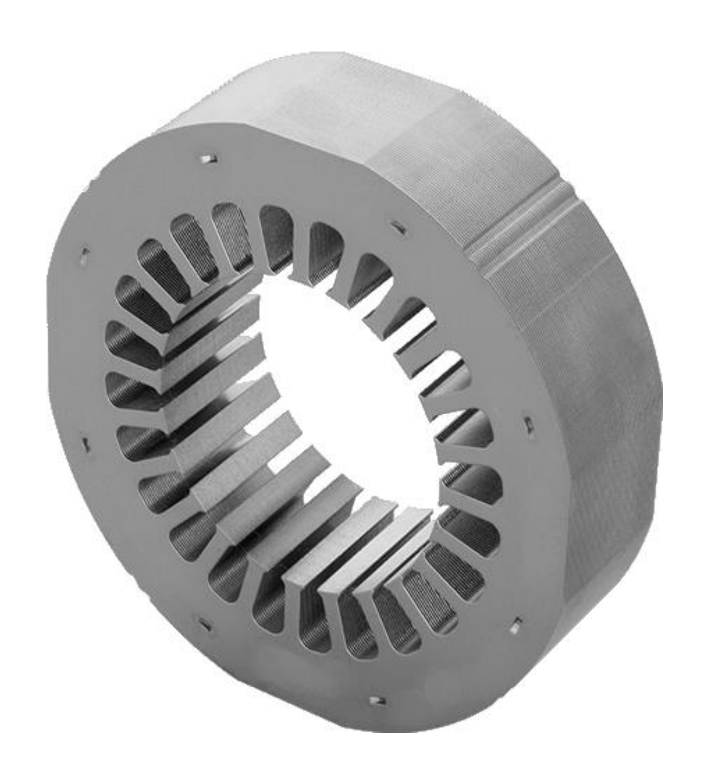
Пересчет обмотки асинхронного двигателя при ремонте



В настоящем документе представлена только часть указанного издания, касающаяся практического пересчета обмоток асинхронных двигателей при ремонте.

Андриевский Сергей Константинович, Шапиро Михаил Наумович

"Ремонт электрических машин и пускорегулирующей аппаратуры" 1959 г.

Rev. 02.   10 Oct 2020

Ремонт обмоток асинхронных электродвигателей.

Определение обмоточных данных.

При ремонте электрических машин, требующем замены обмоток, обычно сохраняют прежние основные параметры машины: мощность, рабочее напряжение и скорость вращения. Поэтому нет надобности производить полный расчет ремонтируемого двигателя. Нужно только снять точную схему его обмотки и записать следующие необходимые данные обмотки статора и обмотки ротора.

Обмотка статора: схема обмотки; марка и диаметр обмоточного провода с изоляцией и без нее; число катушечных групп; число пазов на полюс-фазу или число последовательно соединенных катушек в катушечной группе, размеры и форма катушки; число витков в катушке; шаг обмотки; размеры выступающих лобовых частей; длина пазовой части катушки; размеры и материал пазовой изоляции лобовых частей обмотки (размеры изоляционной ленты и ее материал); при двухслойной обмотке — размеры и материал прокладок между сторонами катушек, лежащих в одном пазу, форма, размеры, материал и число пазовых клиньев.

Обмотка ротора: схема обмотки; число катушек; тип обмотки; шаг обмотки; длина лобовых частей; форма и размеры катушек; эскиз бандажей (число витков, расположение и размеры замков, диаметр бандажной проволоки и т. д.); размеры и материал подбандажной изоляции; число клиньев и их размеры; при стержневой обмотке – размеры стержней ротора; размеры и материал пазовой изоляции; размеры и материал изоляции катушек или стержней в пазовой и лобовой частях; число удлиненных и укороченных стержней; размеры и материал изоляции обмоткодержателя.

Число витков в катушках обмотки, снятых с ротора или статора, удобно определять простым и точным прибором (рис. 65), предложенным М. А. Гашевым (завод "Электросила"). Испытуемую 1 и эталонную 2 катушки включают навстречу друг другу. К ним подают от сети напряжение, ограниченное добавочным сопротивлением 7. Переключателем 8 подбирают такое число витков эталонной катушки, чтобы ваттметр 5 показывал нуль. Токовая обмотка ваттметра питается от сети через добавочное сопротивление 4. На обмотку напряжения ваттметра подается напряжение, индуктируемое в кольцевидной обмотке 3 прибора через усилитель 6, повышающий это напряжение. При нулевом показании ваттметра число витков испытуемой катушки равно числу витков эталонной катушки, которое легко подсчитать по декадному переключателю.

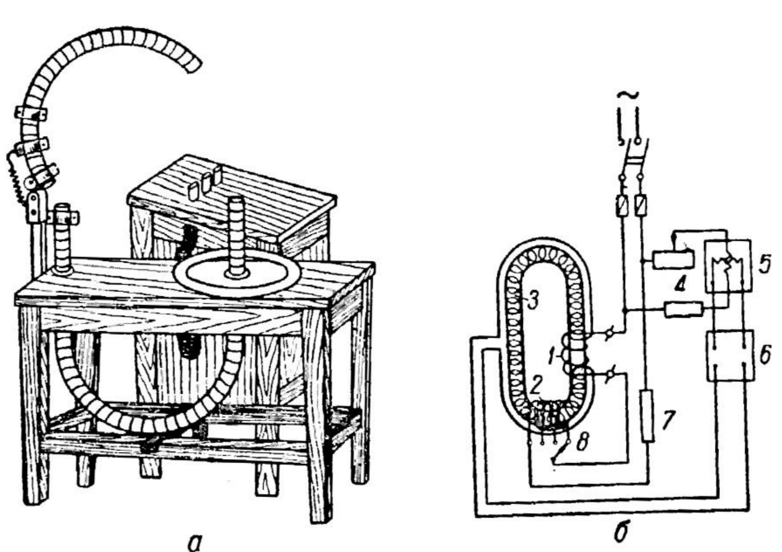


Рис. 65. Прибор М. А. Гашева для определения числа витков:
а – общий вид; б – принципиальная схема.

Обмоточные данные, снятые с натуры, желательно проверить по каталогу или по таблицам заводских обмоточных данных, например, по "Альбомам обмоточных данных" Энергоремтреста или по соответствующим материалам заводов-изготовителей.

Проверочный расчет числа эффективных проводников обмотки.

Если машина уже была в перемотке, при которой могли быть отступления от заводских данных, рекомендуется проводить проверочный расчет (с точностью ±5%) числа эффективных проводников в пазе статора по формуле:

$$w\text{эф} = \frac{2{,}6 \times p \times U\text{ф} \times 10^6}{z \times D\text{р} \times L \times B\text{заз} \times f\beta}$$

где: wэф – число эффективных проводников в пазе;
p – число пар полюсов;
Uф – фазное напряжение (*в*);
z – число пазов статора;
Dр – диаметр расточки статора (*см.*) (рис. 66);
L – длина пакета активного железа без вентиляционных каналов (*см.*),
Активным "железом" в электроремонтной практике принято называть собственно сердечник (а не корпус) статора (или ротора), набранный из тонких листов электротехнической стали и запрессованный в корпус статора (либо насаженный на вал ротора).
Bзаз – максимальная индукция в зазоре (в гауссах, 7500–9000 *гс.*, меньшие величины – для двигателей малой мощности.)
$f\beta$ – обмоточный коэффициент, определяемый в зависимости от характера распределения обмотки (число катушек в катушечной группе) и укорочения шага обмотки (табл. 6). После этого следует проверить, поместится ли в пазе данной машины число эффективных проводников, вычисленное по указанной формуле. Проверку производят по коэффициенту заполнения паза $к$, представляющему отношение суммы площади сечений всех проводников в пазе к площади сечения самого паза:

$$к = \frac{w\text{п} \times S\text{пр}}{S\text{п}}$$

где: wп – число проводников в пазе статора;
Sпр – сечение каждого проводника (в *мм²*);
Sп – площадь сечения паза статора (в *мм²*).

Рис. 66. Основные размеры листа сердечника статора.

Для проверки вначале задаются величиной коэффициента $к$, руководствуясь тем, что для трапецеидальных пазов при однослойной обмотке $к$ = 0,37 – 0,45, а при двухслойной $к$ = 0,35 – 0,42; для овальных же пазов при однослойной обмотке $к$ = 0,42 – 0,55, а при двухслойной $к$ = 0,37 – 0,45. Меньшие величины коэффициентов соответствуют двигателям меньшей мощности, а также малым сечениям провода, так как при этом возрастает общее сечение их изоляции. Затем по формуле:

$$w\text{п} = к \times \frac{S\text{п}}{S\text{пр}}$$

определяют количество проводников в пазе. Если при этом wп ≈ wэф, то укладка обмотки с найденным количеством эффективных проводников в пазе wэф возможна с допустимым отклонением ±5%.

Таблица 6. Величина обмоточного коэффициента в зависимости от коэффициента распределения обмотки и сокращения ее шага.

число катушек в катушечной группе	коэффициент распределения обмотки γ	Сокращение шага обмотки в долях единицы βy									
		0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
		Обмоточный коэффициент $f\beta$									
1	1,000	0,997	0,988	0,972	0,951	0,924	0,891	0,853	0,809	0,760	0,700
2	0,966	0,963	0,954	0,939	0,919	0,893	0,861	0,824	0,781	0,734	0,676
3	0,960	0,957	0,948	0,933	0,913	0,887	0,855	0,819	0,777	0,730	0,672
4	0,958	0,955	0,947	0,931	0,911	0,885	0,854	0,817	0,775	0,728	0,671
5 – 7	0,957	0,954	0,946	0,930	0,910	0,884	0,853	0,816	0,774	0,727	0,670
8	0,956	0,953	0,945	0,929	0,909	0,883	0,852	0,815	0,773	0,727	0,669
9 и более	0,955	0,952	0,944	0,928	0,908	0,882	0,851	0,815	0,773	0,726	0,668

Значительное уменьшение или увеличение числа проводников в пазе (когда $w\text{п} \neq w\text{эфф}$) нежелательно; уменьшение числа витков против расчетного увеличивает нагрев железа и снижает коэффициент мощности электродвигателя; увеличение числа витков против расчетного (за счет уменьшения сечения провода) вызывает увеличение нагрева обмотки и также снижает коэффициент мощности двигателя. Если в ремонт поступает машина без паспортных данных обмотки и определить их по поврежденной обмотке нельзя, то прибегают к приближенному проверочному расчету, приведенному ниже.

Определение обмоточных данных при отсутствии паспорта электрической машины (приближенный проверочный расчет).

Для проведения этого расчета необходимы следующие исходные данные (см. рис. 66). Все размеры в миллиметрах.

Dн – наружный диаметр железа статора;
Dр – диаметр расточки;
$L\text{к}$ – полная длина активного железа с вентиляционными каналами;
L – длина активного железа без каналов;
$L\text{ч}$ – чистая длина активного железа без изоляций между листами пакета;
n – число каналов;
b – ширина каналов;
Hя – высота ярма;
z – число пазов;
bn – ширина паза;
ha – высота паза;
$b\text{з}$ – ширина зубца в самом узком месте.

Расчет.

1. Число пар полюсов:

$$p = \frac{B\text{заз} \times D\text{р} \times L}{2 \times B\text{я} \times L\text{ч} \times H\text{я}}$$

где: Bзаз – максимальная магнитная индукция в воздушном зазоре (6500 – 9000 *гс*);
Bя – магнитная индукция в ярме статора (11000 – 15000 *гс*).

2. Число пазов на полюс – фазу:

$$q = \frac{z}{2p \times m}$$

где: $2p$ – количество полюсов, m – число фаз (обычно m = 3).
3. Магнитная индукция в ярме статора (обратная проверка):

$$B\text{я} = \frac{B\text{заз} \times D\text{р} \times L}{2p \times H\text{я} \times L\text{ч}} = 11000 \div 15000 \quad \text{гс}$$

4. Максимальная магнитная индукция в зубцах:

$$B\text{зуб} = \frac{\pi \times B\text{заз} \times D\text{р} \times L}{z \times b\text{з} \times L\text{ч}} = 15000 \div 18000 \text{ гс}$$

5. Магнитный поток:

$$\Phi = \frac{B\text{заз} \times D\text{р} \times L}{p}$$

6. Число витков обмотки статора:

$$W\text{с} = \frac{U\text{ф} \times 100\ 000\ 000}{\Phi \times 222}$$

или

$$W\text{с} = \frac{U\text{ф} \times p \times 100\ 000\ 000}{222 \times B\text{заз} \times D\text{р} \times L}$$

7. Число проводов в пазе:

$$W\text{п} = \frac{W\text{с} \times a}{p \times q}$$

где: a – число пар параллельных ветвей, или:

$$W\text{п} = \frac{m \times U\text{ф} \times p \times 100\ 000\ 000}{111 \times B\text{заз} \times z \times D\text{р} \times L}$$

8. Площадь сечения для прямоугольного паза: $S\text{п} = b\text{п} \times h\text{п}$
9. Коэффициент заполнения паза принимают предварительно равным: $\text{кп} = 0{,}40$.
10. Полное сечение всей изолированной меди в пазу: $S\text{м} = S\text{п} \times \text{кп}$
11. Сечение каждого изолированного проводника:

$$S\text{пр} = \frac{S\text{м}}{w\text{п}}$$

По таблицам обмоточных проводов находим сечение провода без изоляции по диаметру.
12. Плотность тока в обмотке статора (табл. 7) обычно принимается равной:

$$\Delta = 3{,}0 \div 8{,}0 \quad a/\text{мм}^2$$

13. Величина фазного тока:

$$I\text{ф} = S\text{пр} \times \Delta = \frac{\pi \times d^2 \times \Delta}{4}$$

14. Зная величину фазного тока, определяют кажущуюся и полезную мощность машины. Диаметр обмоточного провода без изоляции должен быть сохранен таким же, как и до ремонта. Отступление от этого может вызвать ненормальную работу машины (перегрев, изменение мощности), а также затруднит укладку обмотки в пазы.

Таблица 7. Магнитные и электрические нагрузки нормальных открытых и защищенных асинхронных двигателей малой и средней мощности напряжением до 500 *в*.

Величины	Обозначения	Единицы измерения	Наружный диаметр активного железа статора (в *мм*.)		
			150–250	200–350	350–550
Индукция в воздушном зазоре	$B_{заз}$	*гс*	7000– 8500	8000–9500	8000–9000
Индукция в ярме статора	$B_{я}$	*гс*	11000–15000	12000–15000	13000–15000
Индукция в зубцах статора и ротора	$B_{з1}$ и $B_{з2}$	*гс*	15000–17000	16000–17000	17500–18500
Плотность тока в обмотке статора	Δ_1	*а/мм²*	6–8	5–7,5	4–5,5
Плотность тока в обмотке короткозамкнутого ротора с медными стержнями	$\Delta_{2к}$	*а/мм²*	7–9	6–8	6,5–7,5
Плотность тока в обмотке фазного ротора	$\Delta_{2ф}$	*а/мм²*	–	6–6,5	6–6,5

Примечание. Данные табл. 7 относятся к двигателям с $2p = 4 \div 8$ при $D_н < 500$ *мм*. и к двигателям с $2p = 4 \div 12$ при $D_н > 500$ *мм*., где $D_н$ – наружный диаметр активного железа статора.

В случае необходимости можно допустить замену одного провода несколькими проводами меньшего диаметра, общее сечение которых (а не диаметр) должно быть равно сечению заменяемого провода. При таких заменах надо учитывать следующее.
1. Число параллельных проводов одинакового сечения (взамен одного) должно быть, как правило, равно двум и, как исключение, не больше трех.
2. Несколько проводов разных сечений можно ставить взамен одного, так как токи между проводами распределяются примерно в соответствии с их сечениями и плотность тока в параллельных проводах практически одинакова. Индуктивные же сопротивления оказывают незначительное влияние на распределение токов в параллельных проводах.
3. Замена одного провода несколькими вызывает уменьшение коэффициента заполнения паза, так как при этом возрастает суммарный слой изоляции всех проводов.
4. Замена нескольких проводов одним равного сечения не всегда возможна, так как при укладке обмотки через прорезь полузакрытого паза провод слишком большого диаметра может не пройти через нее. При несоответствии диаметра провода и ширины паза провод нельзя будет уложить ровными рядами в пазе, что неминуемо вызовет уменьшение коэффициента заполнения паза. Увеличение коэффициента заполнения паза за счет выбора провода с более тонкой (а значит, и ухудшенной) изоляцией не допускается. Также не разрешается уменьшать и толщину пазовой изоляции.

Переключение обмоток на новые напряжения.

Асинхронные двигатели изготовляются на определенное число оборотов и рассчитаны на питание от сети переменного тока с определенным напряжением. При необходимости можно в некоторых случаях изменить рабочее напряжение или число оборотов двигателя, соединив обмотки по новой схеме или, что более сложно, использовав для их намотки провод другого сечения. Повышения рабочего напряжения машины без перемотки ее достигают последовательным включением параллельно соединенных катушечных групп или катушек каждой фазы статора.

При этом напряжение возрастет пропорционально числу последовательно соединенных катушечных групп или катушек, а ток уменьшится во столько же раз. Понижения же рабочего напряжения машины достигают параллельным включением последовательно соединенных катушек или катушечных групп каждой фазы статора. Рабочее напряжение снижается во столько раз, во сколько раз уменьшилось число последовательно соединенных катушек или катушечных групп в фазе. При этом в каждой фазе пропорционально возрастает ток, а поэтому перемычку, все перемычки и выводные проводники обмотки заменяют новыми большего сечения. В каждой же параллельной ветви обмотки ток остается прежним.

Проводя подобные переключения, необходимо распределять участки параллельных ветвей обмотки равномерно по окружности статора. Так, на рис. 113*а*, элементы 1, 2 и 3 одной параллельной ветви и элементы 4, 5 и 6 другой ветви распределены по всей окружности равномерно. Это обеспечивает более равномерное распределение тока между параллельными ветвями обмотки. Наоборот, на рис. 113*б*, каждая ветвь помещена на одной половине окружности, что значительно ухудшает распределение тока между ними. При этих переключениях статора обмотка фазного ротора остается без изменений.

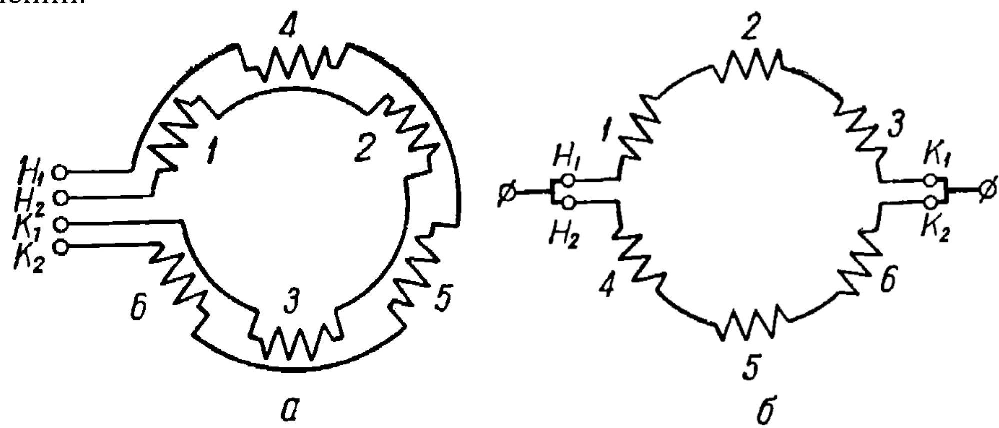


Рис. 113. Распределение участков параллельных ветвей обмоток по окружности статора: а – правильное; б – неправильное.

Пример 2. Двигатель рассчитан на напряжение 500 *в*. В каждой фазе его имеется восемь последовательно соединенных катушек (рис. 114, *а*); фазы соединены треугольником. Требуется переделать этот двигатель на меньшее стандартное напряжение.

Наиболее приемлемы следующие два решения:

1. Соединить восемь последовательных катушек в две параллельные ветви с четырьмя последовательными катушками в каждой ветви (рис. 114, *б*). Новое рабочее напряжение каждой фазы обмотки будет равно 250 *в*, т. е. уменьшится в два раза. Сила тока при этом в два раза возрастет. Тогда двигатель может быть использован в сети с напряжением 220 *в* при напряжении 220/127 *в* соединением его обмоток треугольником, а при напряжении 380/220 *в* двигатель переключают на звезду. Так как фактическое рабочее напряжение составляет 250 *в*, то мощность машины при этом соответственно уменьшится и будет равной 220 : 250 = 0,88 от первоначальной.

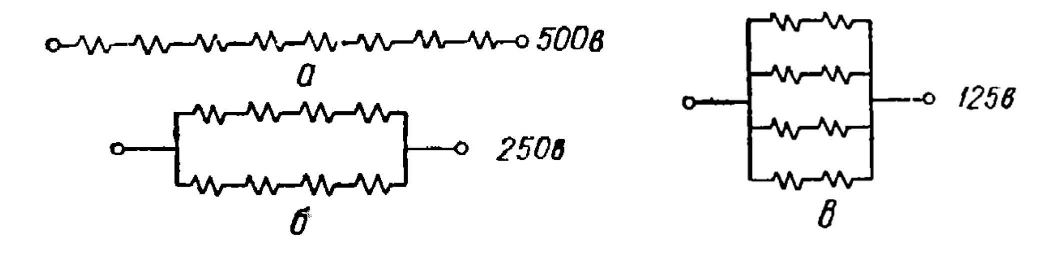


Рис. 114. Переключение статора на параллельные ветви.

2. Соединить восемь последовательных катушек каждой фазы в четыре параллельных ветви с двумя последовательными катушками в каждой ветви (рис. 114, *в*). При этом рабочее напряжение фазы уменьшится в четыре раза и станет равным 500 : 4= 125 *в*. Тогда двигатель можно использовать только в системе 220/127 *в*, включив его на звезду.

Каждая фаза будет работать под напряжением 127 *в*. Ввиду равенства рабочего и нового расчетного напряжения мощность двигателя не изменится. Однако нельзя забывать, что рабочий ток возрастет в четыре раза, что потребует замены соединительных перемычек и выводов обмотки проводом большего сечения. Возможность переключения двигателя на новое напряжение ограничивается прежде всего, конструкцией обмотки статора. При этом простые катушечные обмотки имеют меньше вариантов переключения, чем двухслойные.

В табл. 22 и 23 приведены возможные числа параллельных ветвей обмоток при разных числах полюсов машины. Пользуясь этими данными, можно уменьшить напряжение машины, соответственно увеличив число параллельных ветвей в обмотке ее статора.

Таблица 22. Простые катушечные обмотки.

Число пар полюсов p	1	2	3	4	5	6	7	8
Возможное число параллельных ветвей	1	1; 2	1; 3	1; 2; 4	1; 5	1; 2, 3; 6	1; 7	1; 2; 4; 8

Таблица 23. Двухслойные обмотки.

Число пар полюсов p	1	2	3	4	5	6	7	8
Возможное число параллельных ветвей	1; 2	1; 2; 4	1; 2; 3; 6	1; 2; 4; 8	1; 2; 5; 10	1; 2; 3; 4; 6; 12	1; 7; 14	1; 2; 4; 8; 16

Пример 3. У асинхронного двигателя с простой катушечной обмоткой при напряжении 500 *в* число оборотов равно 485 *об. мин.* На какое более низкое напряжение можно его переделать?

Магнитное поле статора этого двигателя (учитывая скольжение) вращается со скоростью $n1$ = 500 *об. мин.* (см. табл 10).

Число пар полюсов этого двигателя:

$$p = \frac{60 \times f}{n1} = \frac{3000}{500} = 6$$

Такому числу пар полюсов в табл. 22 соответствуют возможные числа параллельных ветвей 1, 2, 3, 6. Увеличив во столько же раз число параллельных ветвей обмотки статора, можно использовать данный двигатель для работы при напряжениях:

$$\frac{500}{2} = \text{ 250 в}, \qquad \frac{500}{3} = 166\text{ в}, \qquad \frac{500}{6} = 86\text{ в}$$

Очевидно, что практически можно использовать этот двигатель в сети с напряжением 220 *в*. Общую схему соединения обмотки статора (звезда или треугольник) необходимо оставить прежней. Кроме того, надо учесть, что перегрузочный момент двигателя будет несколько ниже и составит:

$$\left(\frac{220}{250}\right)^{\mathbf{2}} = 0{,}77$$

от перегрузочного момента до его переключения. Об этом следует помнить и переделанный двигатель при работе не перегружать.

Пример 4. Асинхронный электродвигатель на напряжение 3000 *в* (двухслойная обмотка статора соединена звездой) с числом пар полюсов, равным 6, нужно переделать для работы при напряжении 380 *в* или 500 *в*.

Пользуясь табл. 23, определяем, что если все 12 катушечных групп обмотки каждой фазы соединены последовательно, то, пересоединяя их в шесть параллельных ветвей по две катушечных группы, получаем возможность использовать двигатель для работы при напряжении:

$$\frac{3000}{6} = 500 \text{ в}$$

Если же соединить их в четыре параллельных ветви по три катушечных группы в каждой и переключить обмотку со звезды на треугольник, то двигатель сможет работать при напряжении:

$$\frac{3000}{4 \times \sqrt{3}} = 435 \text{ в}$$

Его тогда можно использовать в сети с напряжением 380 *в*. При этом также немного уменьшится его перегрузочный момент (см. пример 3).

Включение двигателя с напряжением 500 *в* в сеть с более низким напряжением без переделки нежелательно вследствие значительного уменьшения его вращающего момента, увеличения скольжения и возрастания тока в обмотке ротора.

Вместе с тем обмотку статора таких двигателей можно переключить на напряжение 380 *в* с применением специальных схем. Так, обмотка каждой фазы двигателя на 500 *в*, соединенного звездой (рис. 115, *а*), делится на две половины: одна половина всех фаз соединяется в треугольник, а другие половины каждой фазы присоединяются к контактам схемы a, b и d треугольника, образованного первыми половинами фаз (рис. 115, *б*). Переключенный на такую схему электродвигатель не должен нагружаться больше чем на 80–85% номинальной мощности. Необходимость этого вызвана тем, что при полной нагрузке по участкам обмотки C1a, C2b и C3d будет проходить линейный ток двигателя, который от уменьшения напряжения возрастает; тогда перегрев этих участков обмотки неизбежен. На рис. 116 приведена схема двухслойной обмотки электродвигателя с числом пазов z = 36; $2p$ = 4, на которой показаны необходимые переключения.

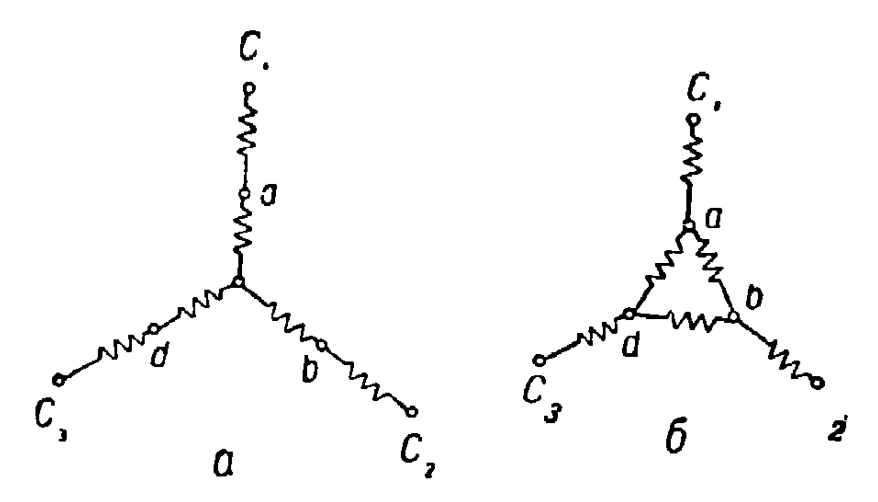


Рис. 115. Переключение обмотки статора на звезду с внутренним треугольником.

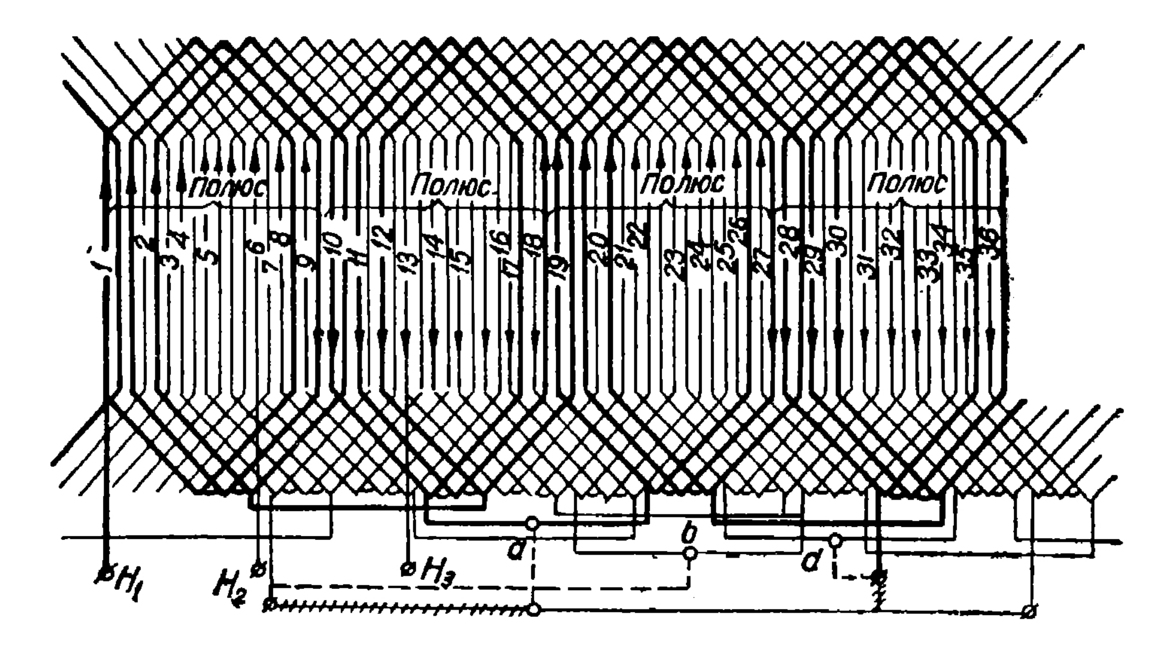


Рис. 116. Схема двухслойной обмотки, изображенной на рис. 115.

Заштрихованные перемычки надо удалить, а пунктирные – добавить. Места соединения *a*, *b* и *d* соответствуют этим же точкам на предыдущем рисунке. Двигатель на 500 *в*, соединенный в треугольник (рис. 117, *а*), переключают на 380 *в* путем удвоения числа параллельных ветвей в каждой фазе и соединения обмоток двигателя в звезду (рис. 117, *б*). Мощность двигателя при этом снижается незначительно – не более чем на 10%, так как на каждой фазе обмотки будет напряжение не 250, а 220 *в*.

Для переключения каждую фазу делят на две равные ветви, для чего катушечные группы фазы соединяют между собой через одну и таким образом распределяют каждую ветвь равномерно по всей обмотке. Полученные в каждой фазе две ветви соединяют параллельно, а фазы – в звезду. Пример переключения обмотки показан на рис. 118.

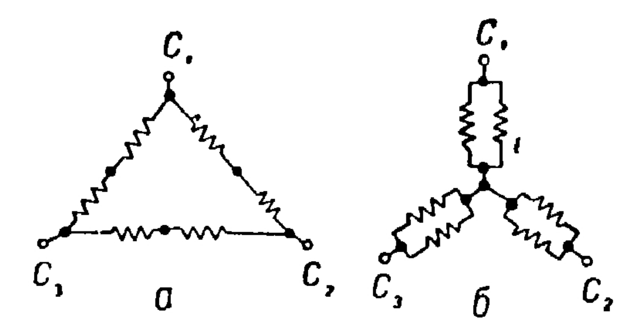


Рис. 117. Переключение обмотки статора на звезду с параллельными лучами.

Когда схема обмотки или отношение напряжений не позволяет получить нового рабочего напряжения машины переключением катушек, то приходится перематывать обмотку статора. Ротор при этом остается без изменений. Поскольку при данных размерах железа статора мощность машины не может быть увеличена, то изменению напряжения должно сопутствовать обратное изменение тока. Если обмотку перематывают на более высокое напряжение, то уменьшение магнитной индукции в зазоре, вызванное уменьшением тока, компенсируется соответствующим увеличением числа проводников обмотки в каждом пазу, благодаря чему магнитная индукция машины остается прежней. Увеличенное число проводников удается поместить в том же пазу, ибо сечение провода также уменьшается пропорционально снижению тока.

Итак, перематывая обмотку на новое напряжение, количество проводников в пазу изменяют пропорционально изменению напряжения, а их сечение – обратно пропорционально ему.

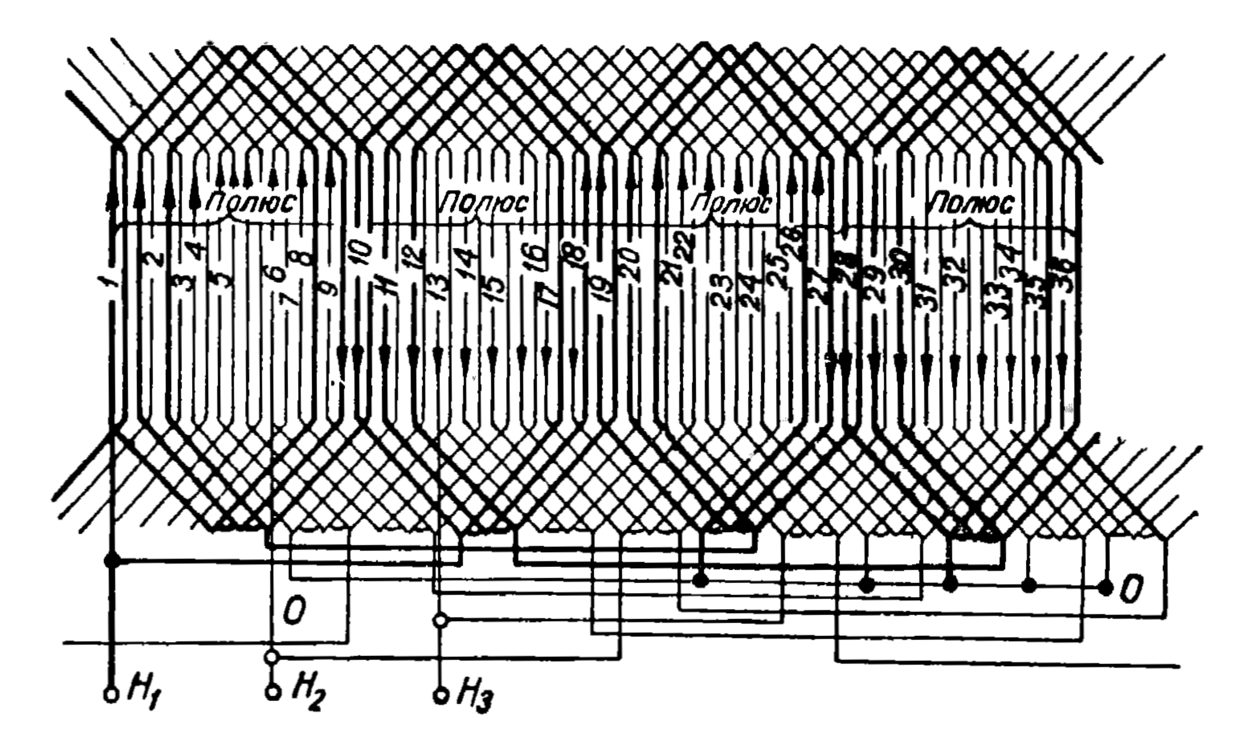


Рис. 118. Схема двухслойной обмотки, изображенной на рис. 117.

Перемотка обмоток на новое напряжение.

Пример 5. Допустим, что пусковой ток короткозамкнутого двигателя, работающего в системе 380/220 *в*, чрезмерно велик для данной системы. Так как двигатель работает при соединении звездой (т. е. каждая фаза его находится под напряжением 220 *в*), то нельзя применить облегченный пуск двигателя переключением со звезды на треугольник с целью уменьшения пускового тока. Для облегчения пуска можно перемотать обмотку на напряжение 380 *в*. Тогда двигатель сможет работать в системе 380/220 *в*, при соединении в треугольник, а запускать его можно будет при соединении в звезду. Для перемотки определим количество проводников w в пазу, которое возрастет в:

$$\frac{380}{220} = 1{,}73 \text{ раза} \quad w\text{нов} = 1{,}73 \times w\text{ст}$$

Сечение провода при этом уменьшится во столько же раз:

$$S\text{нов} = \frac{S\text{ст}}{1{,}73}$$

Пример 6. Обмотка каждой фазы статора электродвигателя была рассчитана на напряжение 127 *в*, вследствие чего двигатель был пригоден только для работы в системе 220/127 *в* при соединении звездой. При переключении сети предприятия на напряжение 380/220 *в* потребовалось переделать двигатель на напряжение 380 *в*, что дало возможность переключить двигатель на треугольник и осуществить облегченный пуск его при соединении звездой. Данные обмотки следующие: все 6 катушек каждой фазы соединены последовательно, число последовательных витков до переделки – 132, в каждой катушке – 132 : 6 = 22 витка. Обмотка выполнена двумя параллельными проводами диаметром 1,56 *мм*. (сечение Sст = 1,91 *мм*²), марки ПБД. Число пазов на статоре 36. Так как катушки соединены последовательно, то нельзя добиться увеличения рабочего напряжения двигателя переключением катушек. Поэтому нужно перемотать обмотку, оставив схему последовательного соединения катушек.

После перемотки число витков в каждой фазе будет:

$$w\text{нов} = w\text{ст} \times \frac{U\text{нов}}{U\text{ст}} = 132 \times \frac{380}{127} = 362 \approx 360 \text{ витков}$$

Сечение провода для новой обмотки:

$$S\text{нов} = S\text{ст} \times \frac{U\text{ст}}{U\text{нов}} = 2 \times 1{,}91 \times \frac{127}{380} = 1{,}27 \quad \text{мм}^2$$

Диаметр нового провода:

$$d\text{нов} = \sqrt{\frac{4 \times S\text{нов}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 1{,}27}{3{,}14}} \approx 1{,}25 \text{ мм.}$$

Число витков в каждой катушке:

$$w\text{кат} = \frac{360}{6} = 60$$

Так как число пазов на статоре равно 36, а общее число витков 360 × 3, то в каждом пазу будет:

$$\frac{360 \times 3}{36} = 30 \text{ проводников}$$

Проверим, поместятся ли эти 30 новых проводников в пазу. Фактическое заполнение паза обмоткой определяется по формуле:

$$S\text{п} = w\text{п} \times \frac{\sqrt{3}}{2} \times (d + 2 \times \Delta)^2$$

Коэффициент $\frac{\sqrt{3}}{2} > \frac{\pi}{4}$ (из формулы площади сечения проводника $\frac{\pi \times (d + 2 \times \Delta)^2}{4}$) взят для учета просветов, имеющихся между проводниками, уложенными в пазу.
В старой обмотке общее число витков было 132 × 3 = 396. В каждом из 36 пазов находилось:

$$\frac{396}{36} = 11 \text{ витков}$$

Так как обмотка была выполнена двумя параллельными проводами марки ПБД с диаметром 1,56 *мм*. (без изоляции), то в каждом пазу находилось 22 таких проводника.
Диаметр этого провода с изоляцией равен 1,83 *мм*. (см. справочные данные по обмоточным проводам), а площадь, занимаемая каждым таким проводом в пазу и вычисленная по формуле:

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \times (d + 2 \times \Delta)^2$$

равна 2,835 $мм^2$.
Общая площадь 22 проводников старой обмотки в пазу равна:

$$S\text{ст} = 22 \times 2{,}835 \approx 62{,}3 \text{ мм}^2$$

Диаметр голых проводов новой обмотки:

$$d\text{нов} = 1{,}25 \text{ мм.}$$

а диаметр с изоляцией – 1,52 *мм*.

Площадь, необходимая для каждого такого проводника в пазу, вычисленная аналогично предыдущему, равна 1,81 *мм²*. Так как проводников в пазу будет 30, то общая площадь:

$$S\text{нов} = 30 \times 1{,}81 \approx 54{,}3 \text{ мм}^2$$

Сравнивая площади *S*ст = 62,3 *мм²* и *S*нов = 54,3 *мм²*, убеждаемся, что витки новой обмотки поместятся в пазу. Кроме того, сечение клиньев необходимо увеличить на 7,5 ÷ 8 *мм²* для плотного закрепления обмотки или применить более толстый слой пазовой изоляции.

Перемотка обмоток на новое число оборотов.

Обычно при переделке двигателя на новое число оборотов напряжение и схема соединения обмотки статора (звезда или треугольник) остаются прежними. Переделка заключается в изменении числа полюсов (статора и фазного ротора). Роторы с короткозамкнутой обмоткой при таких переделках изменять не надо. Для увеличения числа оборотов необходимо уменьшить число полюсов обмотки, для чего меняют шаг обмотки и число катушечных групп в каждой фазе в соответствии с новым числом оборотов (см. табл. 10). Число последовательно соединенных витков и сечение провода при этом оставляют прежними. При увеличении числа оборотов нельзя допускать, чтобы магнитная индукция в железе статора возросла (вследствие уменьшения числа пар полюсов) выше 13500–15000 *гс*. Поэтому перед перемоткой обмотки статора на большее число оборотов необходимо проверить величину индукции в железе статора по формуле:

$$B\text{ст} = \frac{B\text{заз} \times D\text{р}}{1{,}8 \times p \times h}$$

где: *B*ст – средняя индукция в железе статора (в *гс*); *B*заз – максимальная индукция в воздушном зазоре (в *гс*); *D*р – диаметр расточки статора (в *см.*), *p* – число пар полюсов; *h* – толщина железа статора (в *см.*), равная высоте ярма статора *H*я минус высота паза *h*п (см. рис. 66).

Особенно рекомендуется проводить такую проверку при перемотке двигателя с 1500 на 3000 *об. мин.*, когда величина *p* уменьшается вдвое. При пересчете двигателя на другое число оборотов следует учитывать, что:

1. При повышении числа оборотов двигателя немного увеличивается нагрев его подшипников, поэтому необходимо усилить контроль за их температурой.
2. Номинальный вращающий момент двигателя (в *кГм.*) изменяется по формуле:

$$M = 0{,}975 \times \frac{P}{n}$$

где *P* – мощность двигателя (*Вт*); *n* – число оборотов двигателя (*об. мин.*). Поэтому необходимо проверять величину нового вращающего момента, особенно при понижении оборотов.

3. При снижении оборотов двигателя охлаждение его ухудшается вследствие уменьшения количества воздуха, прогоняемого вентилятором через двигатель. В этом случае рекомендуется немного уменьшить нагрузку двигателя и не допускать перегрузки при работе на новых оборотах.
4. При перемотке обмоток двигателя на большее число оборотов увеличивается шаг обмотки и, следовательно, длина ее лобовых частей. Поэтому нужно заранее определить, допускает ли глубина подшипниковых щитов размещение удлиненных лобовых частей статорной обмотки с соблюдением необходимых расстояний от корпуса.

Таблица 10. Число оборотов в зависимости от числа полюсов электрической машины.

Синхронное число оборотов вращающегося магнитного поля машины	Примерное число оборотов ротора с учетом скольжения	Число полюсов	Число катушечных групп в трех фазах
3000	2900	2	3
1500	1440	4	6
1000	960	6	9
750	720	8	12
600	575	10	15
500	480	12	18

Пример 7. Восьмиполюсный двигатель (720 *об. мин.*), каждая фаза которого состоит из четырех последовательно соединенных катушечных групп с двумя катушками в каждой группе, требуется переделать на новое число оборотов – 1440 *об. мин.* (4 полюса).
Для этого необходимо в каждой фазе образовать две последовательные катушечные группы по четыре катушки вместо четырех по две катушки. Шаг должен быть изменен в соответствии с новой схемой четырехполюсной обмотки.
Для уменьшения числа оборотов необходимо изменить число последовательных витков каждой фазы:

$$w\text{ф. нов} = \frac{n\text{ст}}{n\text{нов}} \times w\text{ф. ст}$$

Такое изменение вызовет обратное изменение сечения провода:

$$S\text{нов} = \frac{n\text{нов}}{n\text{ст}} \times S\text{ст}$$

Кроме того, в новой схеме обмотки нужно соответственно увеличить число полюсов, а по новому числу полюсов – и шаг обмотки.

Пример 8. Короткозамкнутый асинхронный двигатель мощностью 4,2 *квт*. с числом оборотов 1440 *об. мин.* (4 полюса) необходимо переделать, уменьшив число оборотов до 960 *об. мин.* (6 полюсов). Обмотка каждой фазы намотана тремя параллельными проводами и состоит из двух последовательно соединенных катушечных групп, образующих 4 полюса, с тремя катушками в каждой катушечной группе. В обмотке каждой фазы 90 последовательно соединенных витков. Диаметр каждого из проводов равен 1,56 *мм*. (сечением 1,91 *мм*^{2}).
Новое число последовательно соединенных витков каждой фазы должно быть:

$$w\text{ф. нов} = \frac{n\text{ст}}{n\text{нов}} \times w\text{ф. ст} = \frac{1440}{960} \times 90 \approx 136$$

Новое сечение этих витков:

$$S\text{нов} = \frac{n\text{нов}}{n\text{ст}} \times S\text{ст} = \frac{960}{1440} \times (3 \times 1{,}91) = 3{,}82 \text{ мм}^2$$

Требуемое сечение витков может быть обеспечено двумя параллельными проводами старой обмотки (2 × 1,91). В соответствии с переходом от четырех к шести полюсам меняется шаг обмотки. Шесть полюсов получим, переключив обмотку каждой фазы на три последовательные катушечные группы вместо двух (см. табл. 10) с двумя катушками в каждой катушечной группе.

Новая мощность электродвигателя будет:

$$P\text{нов} = \frac{n\text{нов}}{n\text{ст}} \times P\text{ст} = \frac{960}{1440} \times 4{,}2 = 2{,}8 \text{ квт}$$

Пример 9. Асинхронный трехфазный электродвигатель завода "Электросила" типа АД мощностью 3,5 *квт* на напряжение 220/330 *в* потребует ток 12,1/7 *а*. Скорость вращения (синхронная) – 750 *об. мин.* Основные обмоточные данные этого двигателя такие: число пазов – 36, число витков в катушке – 38, шаг обмотки (по пазам) 1 – 5, диаметр провода 1,45 *мм*., сечение 1,65 *мм²*, обмотка двухслойная. Двигатель с тем же напряжением нужно переделать на большую скорость – 1000 *об. мин.* (синхронных). Для этого число полюсов двигателя надо уменьшить. Тогда угол между полюсами по окружности статора возрастет, что при неизменной частоте обеспечит увеличение скорости вращения двигателя. Отношение чисел оборотов двигателя составит:

$$\frac{n\text{нов}}{n\text{ст}} = \frac{750}{1000} = 1{,}33$$

Для увеличения числа оборотов необходимо соответственно уменьшить число витков в каждой катушке (не изменяя общего числа последовательных витков обмотки):

$$w\text{нов} = \frac{n\text{ст}}{n\text{нов}} \times w\text{ст} = \frac{750}{1000} \times 38 \approx 28$$

Новое число пар полюсов:

$$2p\text{нов} = \frac{2p\text{ст}}{1{,}33} = \frac{8}{1{,}33} = 6$$

Сечение провода, нужное для перемотки двигателя:

$$S\text{нов} = \frac{n\text{нов}}{n\text{ст}} \times S\text{ст} = 1{,}65 \times 1{,}33 = 2{,}22 \text{ мм}^2$$

диаметр *d*нов = 1,68 *мм²*.

Номинальный ток двигателя при соединении его обмоток, например, в звезду:

$$I\text{нов} = \frac{n\text{нов}}{n\text{ст}} \times I\text{ст} = 7{,}1 \times 33 = 9{,}4\ a$$

Провод увеличенного сечения может выдержать такой нагрузочный ток.

Мощность двигателя после переделки:

$$P\text{нов} \approx P\text{ст} \times \frac{n\text{нов}}{n\text{ст}} = 3{,}5 \times 1{,}33 = 4{,}65 \text{ квт}$$

Перед перемоткой двигателя надо установить, исходя из конфигурации боковых крышек двигателя, уместятся ли в них лобовые части обмотки, размеры которых немного увеличатся из–за того, что шаг обмотки стал больше.

Переделка фазных роторов на короткозамкнутые.

В практике иногда возникает необходимость переделки фазного ротора на короткозамкнутый. Для двигателей небольшой мощности, работающих в нормальных эксплуатационных условиях, такая переделка не представляет сложности и может быть осуществлена изготовлением беличьего колеса из меди или отливкой его из алюминия.

Чтобы переделанный двигатель при номинальной нагрузке и скорости не перегревался, нужно, чтобы общее сечение меди в каждом пазу короткозамкнутого ротора было не меньше, чем у фазного ротора. При переделке удаляют фазную обмотку, очищают пазы от изоляции и, не изменяя их размеров, вставляют в ротор беличье колесо из медных стержней, спаянных или сваренных по торцам бронзовыми или медными кольцами. Для этого в кольцах просверливают отверстия, в которые входят концы всех стержней. Сечение каждого кольца берут в 6 – 8 раз большим, чем сечение стержня. Можно также отлить алюминиевое беличье колесо одним из рассмотренных ранее способов. Опасности перегрева этой обмотки вследствие большего удельного сопротивления алюминия практически не возникает. Площадь сечения алюминиевых стержней в пазу получается на 50 – 70% больше, чем суммарная площадь сечения медных проводников фазной обмотки (за счет просветов и места, ранее занятого изоляцией). Переделанный двигатель при номинальной скорости будет развивать такую же мощность, как и до переделки, но пусковой момент его уменьшится, поэтому он может быть использован только для привода механизмов, запуск которых осуществляется без значительной первоначальной нагрузки (металлообрабатывающие станки, компрессоры, вентиляторы, сельскохозяйственные машины). Надо также учесть, что пусковой ток такого двигателя будет уже в 5 ÷ 7 раз больше Iном. Следует отметить ошибочность встречающейся иногда на практике переделки фазного двигателя на короткозамкнутый посредством замыкания накоротко его роторной обмотки: фазная обмотка не рассчитана на большой пусковой ток и в результате такой переделки обмотка фазного ротора сгорает.

Переделка односкоростных асинхронных двигателей на многоскоростные.

В последнее время в различных отраслях промышленности широко применяют многоскоростные асинхронные электродвигатели. При внедрении таких двигателей значительно упрощается конструкция проводимых ими в движение механизмов вплоть до отказа от коробок скоростей, резко улучшаются технологические и эксплуатационные качества механизмов. Однако в производственных условиях весьма часто может не оказаться нужных многоскоростных двигателей. Поэтому их изготовляют в процессе капитального ремонта серийных односкоростных асинхронных двигателей. Рассмотрим более подробно вопрос о переделке односкоростных асинхронных двигателей на многоскоростные.
Как известно, число оборотов ротора асинхронного двигателя:

$$n_2 = \frac{60 \times f}{p} \times (1 - s)$$

где: f – частота переменного тока; p – число пар полюсов обмотки статора; s – скольжение.

Проанализировав приведенное выражение, нетрудно сделать вывод, что регулировать число оборотов ротора можно изменением частоты в сети, скольжением, либо изменением числа пар полюсов обмотки двигателя. Первые два пути довольно сложны, так как требуют дополнительно специальных индивидуальных генераторов, обеспечивающих переменную частоту питающей сети, или дополнительных сопротивлений, включение которых в цепь статора или ротора вызывает изменение скольжения двигателя. Подобные системы регулирования встречаются в некоторых электроприводах в металлургии, текстильной промышленности – у рольгангов, прокатных станов, прядильных машин, но широкого распространения они не получили. Гораздо более простым является ступенчатое регулирование скорости вращения ротора двигателя путем изменения числа пар полюсов его обмотки статора.

Осуществить это изменение можно либо переключением обмотки, либо уложив в пазах статора не соединенные электрически друг с другом обмотки, обеспечивающие различное число оборотов. Включая то одну, то другую обмотку, обеспечивают разную скорость вращения ротора. Таким путем и получают асинхронный двигатель с несколькими определенными скоростями вращения ротора (обычно с 2–я, 3–я или 4–я скоростями), называемый многоскоростным двигателем.
Практика использования подобных двигателей мощностью до 100 *квт*. показала, что рациональнее всего ограничиваться скоростями вращения от 500 до 3000 (синхронных) *об. мин.* Более тихоходные двигатели изготавливать не рентабельно, так как уменьшение скорости вызывает увеличение размеров и стоимости двигателей.
При переделке односкоростного двигателя на многоскоростной естественно изменяется и режим его работы. Поэтому перед тем, как переделывать такой двигатель, необходимо расчетным путем проверить электрическую и магнитную нагрузки на двигатель (плотность тока в обмотке и магнитную индукцию в воздушном зазоре) при работе его на скоростях, отличных от паспортной. Для этого сначала определяют номинальные данные односкоростного двигателя: мощность P, фазное напряжение Uф, фазный ток Iф, число оборотов $n2$, коэффициент мощности $cos\varphi$ и т. д.
После этого определяют основные размеры и обмоточные данные двигателя. Наиболее простым способом является переделка односкоростного двигателя на двух– или трехскоростной с такими дополнительными скоростями, которые выше паспортной скорости переделываемого двигателя. Примером этому может служить переделка односкоростного двигателя с 1000 *об. мин.* на двухскоростной с 1000/1500 *об. мин.*, или на трехскоростной с 1000/1500/3000 *об. мин.* В этом случае проверочный расчет упрощается тем, что плотность тока в обмотке и магнитную индукцию в воздушном зазоре можно оставить такими же, как и у односкоростного двигателя до переделки, если проверка величины индукции в ярме Bя при высшей скорости показала, что она не превышает допустимых пределов. Оставляют неизменным для переделываемой машины и произведение:

$$w\text{ф} \times f\beta$$

где:

$$w\text{ф} = \frac{w\text{эф} \times z}{12a}$$

wф – число витков обмотки в фазе;
wэф – число эффективных витков обмотки; $f\beta$ – обмоточный коэффициент; a – число параллельных ветвей; z – число пазов.

Обычно обмоточный коэффициент $f\beta$ многоскоростной обмотки сравнительно с односкоростной уменьшается примерно на 10%. Поэтому при переделке двигателя его номинальное напряжение и величину магнитной индукции в воздушном зазоре не меняют, а для того чтобы произведение wф × $f\beta$ осталось неизменным, число витков обмотки в фазе wф увеличивают примерно на 10%. При этом мощность переделываемого двигателя снижается на 10%. Снижение мощности можно несколько уменьшить за счет более плотного заполнения паза обмоткой – примерно на 5%. Этого достигают, применяя провода с более тонкой изоляцией – например, ПЭЛБО вместо ПБД. В конечном счете мощность многоскоростного двигателя все же снижается на 5%, о чем необходимо помнить при его дальнейшей эксплуатации. При переделке односкоростного двигателя на двухскоростной, вторая скорость которого меньше той скорости, которую имел двигатель, мощность его снижается на 40 – 50%.

Пример 10. Асинхронный двигатель серии "Урал", типа Р–42/6, мощностью 3,4 *квт*. на напряжение 220/380 *в* с потребляемым током 13,8/8 *а*, cosφ = 0,78, делающий 960 *об. мин.*, надо переделать на двухскоростной с синхронными скоростями 750/1500 *об. мин.*
При переделке требуется сохранить мощность двигателя примерно одинаковой на обеих скоростях. Наружный диаметр железа статора *D*н = 245 *мм*.; диаметр расточки *D*р = 154 *мм*.; полная длина активного железа статора *L* = 102 *мм*.; длина активного железа без вентиляционных каналов *L*ч = 95 *мм*.; ширина зубца *b*з = 8,45 *мм*.; высота ярма *H*я =24 *мм*; площадь сечения паза *S*п =162 $мм^2$; число пазов *z* = 36 (рис. 66).
Обмоточные данные двигателя: обмотка – двухслойная, шаг по пазам *y* = 5, число пазов на полюс–фазу *q* = 2. число проводов в пазу *w*п = 37, в эквивалентном витке 18 или 19 витков; средняя длина витка *l*ср = 0,47 *м*.
Обмотка из провода ПЭЛБО, диаметр меди которого 1,25 *мм*., а диаметр с изоляцией – 1,45 *мм*., выполнена одной параллельной ветвью. Площадь сечения голого провода *S*пр = 1,23 $мм^2$, а провода с изоляцией *S*из = 1,68 $мм^2$. Соединение обмотки – последовательное. Для переделки на двухскоростной двигатель наиболее подходит схема обмотки треугольник – двойная звезда; △/YY.
Задаемся величиной магнитной индукции в зазоре – *B*заз. Допустимые пределы магнитной индукции для двигателей небольшой мощности 6500 – 9000 *гс*.
Учитывая, что 750 *об. мин.* – сравнительно небольшое число оборотов, при котором условия охлаждения – относительно плохие, будем рассчитывать двигатель на малую нагрузку. При этом, очевидно, будет и малая индукция.
Из этих соображений зададимся величиной магнитной индукции в зазоре *B*заз = 6800 гс.
Следует помнить, что индукция при высшей скорости вращения превосходит индукцию при низшей скорости примерно на 10–35%. Значит, в нашем случае величина *B*заз при работе двигателя с 1500 *об. мин.* будет:

$$B\text{заз} = 6800 + \frac{6800}{100} \times 35 \approx 9200 \text{ гс}$$

что вполне допустимо.
Шаг обмотки оставляем неизменным: *y* = 5.
Число пазов на полюс–фазу для 1500 *об. мин.* (2*p* = 4) будет:

$$q = \frac{z}{2p \times m} = \frac{36}{4 \times 3} = 3$$

где *m* – число фаз.
Обмотка, шаг которой *y* = 5 и число пазов на полюс–фазу *q* = 3, выполненная по схеме △/YY, приведена на рис. 119.
Определяем число проводов в пазу по формуле:

$$w\text{п} = \frac{m \times U\text{ф} \times p \times 100\,000\,000}{111 \times B\text{заз} \times z \times D\text{р} \times L\text{з}} = \frac{3 \times 380 \times 4 \times 100\,000\,000}{111 \times 6800 \times 36 \times 15{,}4 \times 9{,}5} = 116 \text{ проводов}$$

где *p* = 4 (для 750 *об. мин.*).
Коэффициент заполнения паза:

$$\text{к} = \frac{w\text{п} \times S\text{пр. из}}{S\text{п}} = \frac{37 \times 1{,}68}{162} = 0{,}38$$

где: *S*пр.из –площадь сечения провода с изоляцией.
Учитывая, что при переделке будет применен более тонкий провод, отчего зазоры между проводниками в пазу уменьшатся по величине, принимаем коэффициент заполнения паза к = 0,41. Отсюда площадь паза, которую будет занимать новая обмотка, равна 0,41 × 162 = 66,5 $мм^2$.

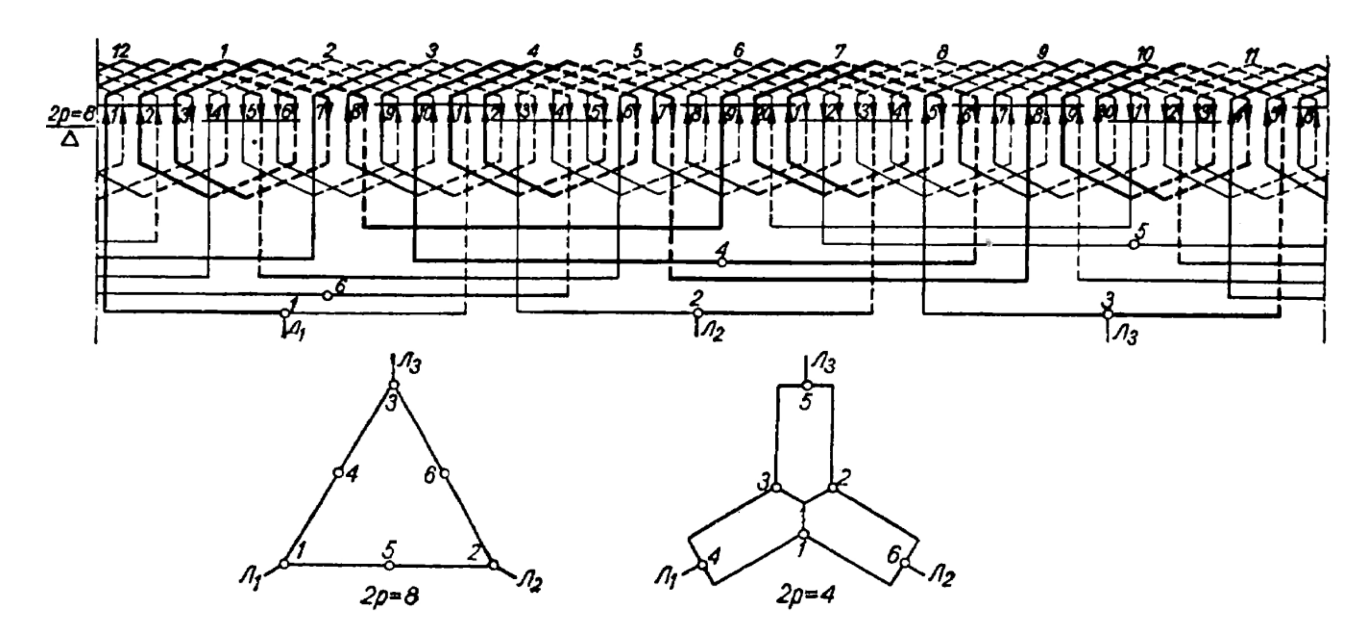


Рис. 119. Рабочая схема треугольник – сдвоенная звезда для получения двух скоростей – 750 и 1500 *об. мин.* (синхронных).

Зная, что число проводов в пазу при новой обмотке – 116, найдем сечение провода и изоляции в этой обмотке:

$$S\text{пр. из} = \frac{66{,}5}{116} = 0{,}575 \text{ мм}^2$$

По таблице "Провод обмоточный круглого сечения" находим ближайшее стандартное сечение – 0,581 *мм*², (принимаем в сторону увеличения). Значит новую обмотку будем выполнять проводом сечением *S*пр.из = 0,581 *мм*². Диаметр этого провода: голого – 0,69 *мм.*, с изоляцией – 0,86 *мм*.

Итак, данные новой обмотки двигателя типа Р–42/6 следующие:
Обмотка остается двухслойной, шаг y = 5, число проводов на полюс–фазу q = 3, диаметр голого провода ПЭЛБО – 0,69 *мм.*, с изоляцией – 0,86 *мм*. Обмотка соединяется по схеме рис. 119. Согласно этим данным и выполняется двухскоростная обмотка двигателя. Полезная мощность двигателя при 750 *об. мин.* равна примерно половине номинальной (соответствовавшей 1000 *об. мин.*). Численно мощность:

$$P750 = 3{,}4 \times 0{,}5 = 1{,}7 \text{ квт}$$

При 1500 *об. мин.* мощность двигателя будет также меньше расчетной. Об этом надо помнить и не перегружать переделанный двигатель.

Подробнее переделка односкоростных двигателей на многоскоростные описана в книге
А. М. Харитонов "Многоскоростные электродвигатели", Госэнергоиздат, 1954 г.
А. М. Харитонов "Многоскоростные электродвигатели в промышленных электроприводах", Энергия, 1971 г.